

VIBRAÇÕES NA ATMOSFERA E NOS TERRENOS ADJACENTES PÓS DETONAÇÃO DE EXPLOSIVOS – QUANTIFICAÇÃO DA SUA AFECTAÇÃO AMBIENTAL

C. Dinis da Gama

Instituto Superior Técnico
(dgama@ist.utl.pt)

Resumo

A utilização de explosivos nas operações de escavação de maciços rochosos provoca impactes ambientais de diversos tipos que interessa controlar por forma a não comprometer a eficácia dessas operações.

Dentre tais impactes figuram as vibrações transmitidas à atmosfera (mais conhecidas por ruído, ou onda aérea) e aquelas que se propagam pelos terrenos próximos, umas e outras susceptíveis de ocasionar desconforto (ou incomodidade) às pessoas situadas na vizinhança, além de danos físicos às estruturas adjacentes.

Neste artigo aborda-se a problemática destes fenómenos com base na normalização existente, nos critérios geotécnicos de qualidade e na quantificação da afectação ambiental que caracteriza os referidos impactes.

Palavras-chave: vibrações, ruídos, onda aérea, incomodidade, danos.

AIR AND GROUND VIBRATIONS CAUSED BY EXPLOSIVE DETONATION – QUANTIFICATION OF THEIR ENVIRONMENTAL EFFECTS

Abstract

The utilization of explosives in rock mass excavation operations causes several types of environmental impacts which should be controlled in order to avoid reductions on the profitability of those operations.

Within the impacts that are easily noticed, air vibrations (also known as noise or blast wave) and those related to ground vibrations, both aimed at creating discomfort or annoyances to people located nearby, besides the occurrence of physical damage to built structures.

In this article the problems originated by such phenomena are analyzed in terms of the existing standards, as well as the application of geotechnical quality criteria and on the adequate quantification of resulting environmental impacts.

Keywords: vibrations, noise, blast wave, nuisance, damage

1 Introdução

As obras geotécnicas urbanas têm de ser realizadas de forma sustentável e nomeadamente considerando a componente ambiental. Dentro desta componente, o ruído e vibrações constituem os descritores ambientais que merecem uma atenção especial, por serem os que podem causar maior incomodidade às pessoas residentes ou utentes, com são as ruas e estações de transportes públicos.

A avaliação do ruído e vibrações precisam, nesses casos, de uma caracterização na situação de referência, seguida da monitorização nas sucessivas fases do avanço da obra, para determinar se a alteração afecta a qualidade ambiental ou não. Para este objectivo é necessário realizar medições "in situ" e comparar os resultados obtidos com as Normas de qualidade em vigor.

Sempre que se utiliza a técnica de desmonte de rochas com explosivos, é essencial realizar um controle dos impactes ambientais causados por esta técnica. Assim, é importante a quantificação de alguns parâmetros, considerados importantes, para o controle dos impactes ambientais, nomeadamente:

1. Vibrações (ou abalos);
2. Ruídos (onda de choque pela atmosfera);
3. Lançamento de blocos;
4. Produção de poeiras;
5. Sobrefracturação e estabilidade da rocha remanescente.

Os dois primeiros impactes serão analisados detalhadamente no parágrafos seguintes, tendo em vista a quantificação da sua afectação ambiental.

2 Vibrações

2.1 Considerações gerais

As actividades de extracção de rocha para fins industriais, designadamente a exploração de inertes calcários, processam-se, na esmagadora maioria dos casos, com recurso a explosivos. Este método tem-se revelado como o mais apropriado, tanto em termos económicos como operacionais.

As recentes evoluções técnicas na compreensão dos processos que regem esta actividade e o grau de conhecimento adquirido ao longo dos tempos, fornecem, actualmente, os instrumentos suficientes para permitir minorar os impactes negativos ambientais decorrentes destas actividades.

O desmonte de rocha com explosivos induz um conjunto de acções benéficas e um conjunto de acções prejudiciais, que importa analisar. Entre as acções benéficas ligadas à actividade industrial extractiva, encontram-se o arranque da rocha do maciço e a sua cominuição, facilitando assim as actividades de remoção, transporte e processamento destes materiais. Entre as acções prejudiciais contam-se as vibrações, os ruídos, os gases, as poeiras e a projecção de partículas ou blocos, os quais podem causar danos a estruturas adjacentes e transtornos às populações localizadas nas imediações.

A metodologia que deve ser utilizada para a caracterização das vibrações resultantes das detonações envolve a utilização de uma rigorosa instrumentação de registo. Deste modo, podem ser aferidas as variáveis determinantes no processo, como sejam, a carga de explosivo por furo, as distâncias aos pontos de referência, o número de furos e número de retardos e a carga instantânea a detonar.

Existem vários critérios para o controle de vibrações, sendo os mais usuais:

- U. S. Bureau of Mines;
- Escala de Reiher – Meister (Alemanha);
- Nitro Nobel (Suécia);
- Crandell (U.S.A);
- Tensões Dinâmicas ().

Os valores mais significativos destes critérios de dano estrutural estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Critérios para o controle de vibrações.

PARÂMETROS	AUTORES	CRITÉRIOS
Aceleração das Vibrações (g – aceleração da gravidade)	Thoenen & Windes (1942)	< 0.1g – Segurança 0.1g a 1g – Precaução > 1g - Perigo
Relação de Energia: $RE = \frac{a}{f^2}$	Crandell (1949)	< 3 – Segurança 3 a 6 – Precaução > 6 - Perigo
Velocidade de Partícula	Langefors (1958) Edwards (1960) Duvall & Fogelson (1962)	< 5 cm/s – Segurança 5 a 10cm/s – Danos pequenos 10 a 16cm/s – Danos moderados 16 a 23cm/s–Danos sérios > 23 – Colapso

2.2 Magnitude das vibrações

Os efeitos nocivos que as vibrações podem motivar em estruturas civis anexas, estão limitados pelo valor de pico da velocidade vibratória, prevista na NP 2074 de 1983, "Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares".

A vibração de pico (ou resultante), para a qual existem os limites da NP-2074, é calculada com base nas três direcções da onda vibratória (longitudinal, transversal e vertical).

$$V_R = \sqrt{V_l^2 + V_t^2 + V_v^2} \quad (1)$$

A NP-2074 estabelece valores para a velocidade de vibração de pico v_L (m/s), de acordo com a expressão:

$$V_L = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \quad (2)$$

em que α é um factor numérico que diz respeito às características do terreno onde se propagam as vibrações, β refere-se ao tipo e/ou sensibilidade das construções a monitorizar e γ à frequência diária de ocorrência de eventos causadores de vibrações.

A utilização desta expressão dentro da gama possível das constantes α , β e γ permite a construção do quadro seguinte.

Tabela 2 – Valores limites de velocidade de vibração de pico [mm/s] (Moura Esteves, 1993).

Tipos de Construção	Solos incoerentes soltos, areias e misturas areia-seixo bem graduadas, areias uniformes, solos coerentes moles e muito moles	Solos coerentes muito duros, duros e de consistência média, solos incoerentes compactos; areias e misturas areia-seixo bem graduadas, areias uniformes	Rocha e solos coerentes rijos
Construções que exigem cuidados especiais	2,5	5	10
Construções correntes	5	10	20
Construções reforçadas	15	30	60

Nota : Estes valores deverão ser corrigidos com um factor de redução 0,7, no caso de se efectuarem mais de três explosões (ou pegas) por dia.

Convém destacar que o limite de percepção humana se situa em torno de 0,3 mm/s.

Relativamente à validade da NP-2074, e não pretendendo discutir esta Norma Portuguesa, convém fazer dois alertas:

- A NP-2074 não impõe quaisquer limites para a frequência das vibrações. Ora, é sabido que a proximidade de frequências das vibrações e da ressonância dos materiais de construção poderá induzir danos importantes às estruturas;
- A V_r (velocidade vibratória de pico ou resultante) é a mesma para estes dois exemplos (20 mm/s), 1º) $V_t=11,5$ mm/s; $V_l=11,5$ mm/s; $V_v=11,5$ mm/s; 2º) $V_t=0$ mm/s; $V_l=20$ mm/s; $V_v=0$ mm/s; mas os efeitos sobre as estruturas deverão ser piores no segundo caso.

2.3 Vibrações resultantes do desmonte com explosivos

O desmonte com explosivos junto a áreas urbanas ou estruturas, reveste-se de grandes dificuldades e exige um apurado domínio por parte dos executantes. Assim, a utilização dos explosivos pode, e deve, ser alvo de um estudo preliminar com vista à determinação ou, no mínimo, à detalhada previsão dos objectivos a atingir e das causas resultantes, sustentado pelo conhecimento disponível sobre o meio, e sobre os materiais e técnicas de desmonte a utilizar.

Existem, actualmente, mecanismos que permitem prever com alguma precisão, os efeitos causados por uma detonação, relativamente à vibração resultante, e aos valores que a sua velocidade atinge nas imediações do local de origem.

As principais variáveis que determinam o efeito das vibrações nos terrenos encontram-se representadas na expressão proposta por Johnson (1971):

$$v = a Q^b D^{-c} \quad (3)$$

onde: v - velocidade de pico crítica de partícula [mm/s] ;

Q - quantidade de explosivo por retardo [kg] ;

D - distância entre a detonação e o local em estudo [m] ;

a, b, c - constantes que dependem das características da rocha, tipo de explosivo e técnica de desmonte.

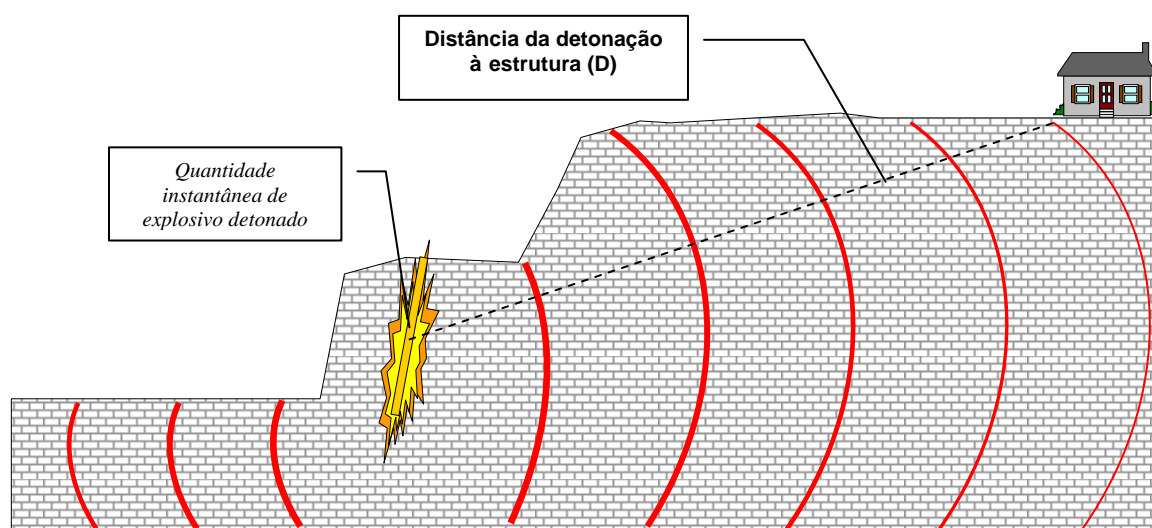


Figura 1- Perfil esquemático das principais variáveis que influenciam as vibrações

Segundo o critério do USBM (United States Bureau of Mines), utilizado como primeira aproximação quando não existem registos de vibrações, a distância de segurança D (m) deve estar relacionada com a carga de explosivo por retardo Q (kg), da seguinte forma:

$$D \geq 22,5 \times Q^{1/2} \quad (4)$$

A expressão anterior deve ser apenas utilizada nas fases que antecedem as detonações iniciais, uma vez que a metodologia recomendada neste tipo de estudos impõe um critério de retroanálise de forma a serem determinados os valores das constantes empíricas para o maciço em causa, isto é, estabelecer as constantes a , b e c (Johnson, 1971), em função da melhor correlação possível.

Qualquer uma das expressões acima enunciadas é aplicável. Contudo, optou-se por escolher a que possui maior informação acumulada, isto é, a expressão para a qual existe a maior base de dados que é a proposta por Johnson (1971).

Uma vez realizadas as primeiras pegadas de fogo é possível, com base nas leituras dos sismógrafos (Figura 2), estabelecer correlações que levem à determinação das constantes a , b e c da expressão de Johnson, para o tipo de maciço em causa. Este procedimento deve ser repetido sempre que as características do maciço se alteram, de forma a calibrar as constantes referidas de acordo com o terreno envolvido.

Apresentam-se de seguida os valores de a , b e c , para diferentes tipos de rocha, obtidos a partir de vários estudos realizados em Portugal e no estrangeiro. Estes valores podem servir de orientação na previsão da magnitude da velocidade de vibração de pico, antes do início das detonações, não dispensando contudo a instrumentação e determinação correcta destas constantes para o maciço envolvido.

Tabela 3 - Valores das variáveis a, b e c para diversos tipos de maciço.

MACIÇO ROCHOSO	FONTE	a [mm/s]	b	c
Xisto-grauvaque (Beliche, Algarve)	Remísio (1994)	1598	0,88	-2,06
Granito, Gneiss, Pegmatito	Holmberg (1982)	700	0,7	-1,5
Hematite	Dinis da Gama (1979)	380	0,73	-1,87
Calcário	Dinis da Gama (1997)	580	0,6	-1,4
Calcário pisolítico	VISA Consultores (1999)	500	0,42	-1,22
Basalto	Dinis da Gama (1997)	2000	0,7	-1,9



Figura 2 - Sismógrafo com transdutor triaxial e microfone

De forma a limitar a utilização de cargas a um valor de segurança, é possível utilizar uma das expressões de cálculo para, em função das estruturas da envolvente, criar uma planta com as zonas de cargas de explosivos a utilizar. A Fig. 3 ilustra tal aplicação.

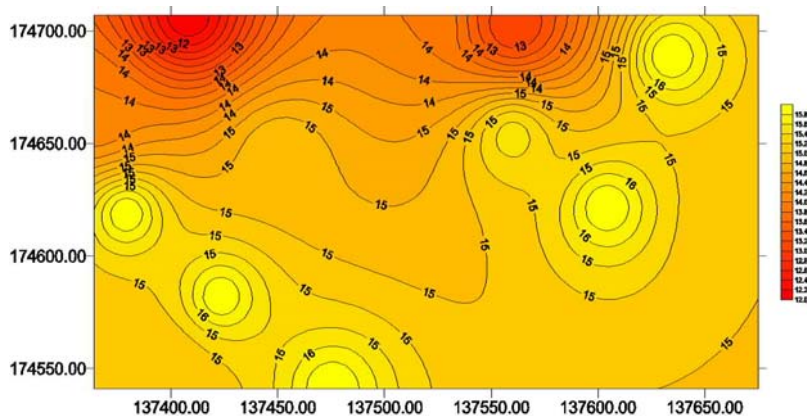


Figura 3 - Cargas instantâneas de explosivo máximas (kg) a utilizar nas diferentes zonas da pedra/obra

3 Ruído

3.1 Generalidades

O ruído pode ser definido como um conjunto de sons desagradáveis e frequentemente irritantes. Para além de um determinado nível torna-se incómodo, sendo obstáculo à comunicação e contribui para o aumento da fadiga, podendo provocar alterações no sistema nervoso e mesmo traumatismos auditivos.

O som é provocado pelas perturbações que a vibração de uma superfície sólida produz no meio, propagando-se nele em todas as direcções. No ar esta perturbação manifesta-se em pequenas flutuações de pressão que são detectadas pelo ouvido humano (Figura 4). As vibrações deslocam-se através do ar sob a forma de ondas que transmitem a pressão.

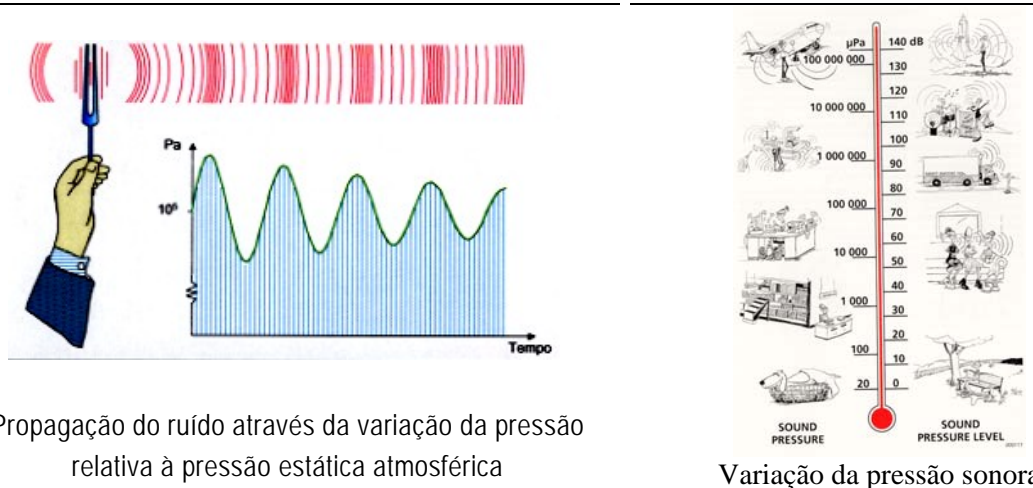
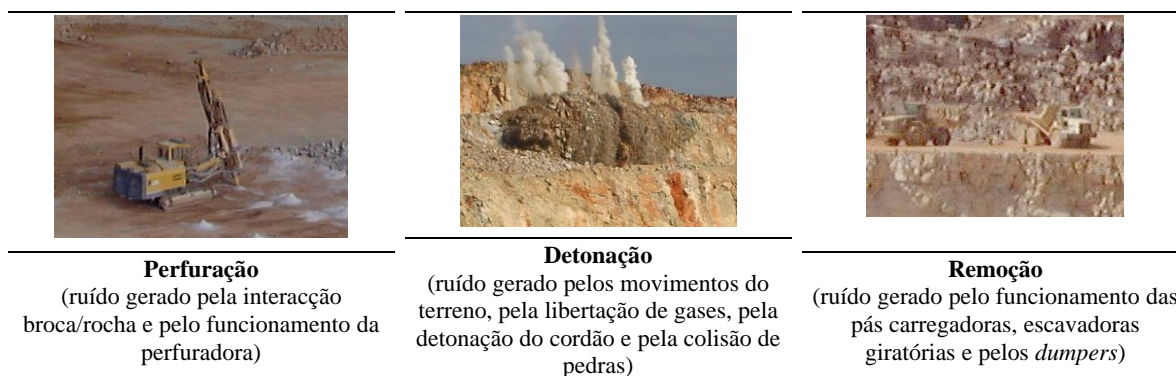


Figura 4 - Propagação do ruído e escala da pressão sonora (adaptado de Brüel & Kjaer)

Tabela 3 - Tipos de ruído

Ruído contínuo	Ruído intermitente	Ruído impulsivo
<p>Ruído cujos níveis de pressão sonora e espectro de frequência se mantêm constantes no tempo</p>	<p>Ruído cujos níveis de pressão sonora e o espectro de frequência variam em intervalos bem definidos, podendo ser periódicos (típico da operação de perfuração)</p>	<p>Ruído de muito curta duração (< 200ms) e com um nível de pressão sonora bastante elevado (típico da acção de explosivos)</p>



Perfuração
(ruído gerado pela interação broca/rocha e pelo funcionamento da perfuradora)

Detonação
(ruído gerado pelos movimentos do terreno, pela libertação de gases, pela detonação do cordão e pela colisão de pedras)

Remoção
(ruído gerado pelo funcionamento das pás carregadoras, escavadoras giratórias e pelos *dumpers*)

Figura 5 - Principais fontes de ruído associadas ao uso de explosivos

3.2 Equipamentos de Medição

Para medir os níveis de ruído utilizam-se aparelhos denominados sonómetros. Estes são compostos por um microfone que capta as ondas sonoras, as quais são posteriormente sujeitas a um conjunto de tratamentos de codificação e filtragem, dos quais resulta o nível de ruído relativo à medição realizada.

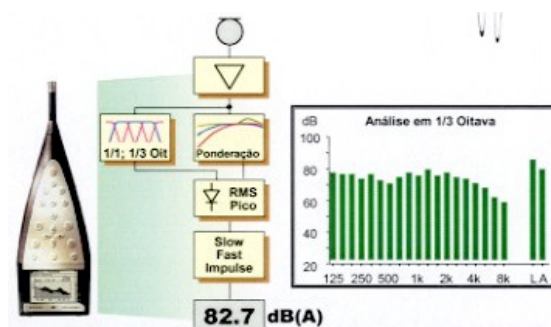


Figura 6 - Exemplo de um analisador de ruído em tempo real da Brüel & Kjaer modelo 2260

Existem no mercado vários tipos de sonómetros em função das suas características e capacidades de medição. O mais adequado para fazer estudos de ruído ambiental deve ser um sonómetro integrador com análise de frequências (em 1/3 de oitava) e em tempo real, também denominado de analisador em tempo real, o qual permite a análise do ruído no espectro de frequências em simultâneo com a medição do ruído ambiente (nível sonoro contínuo equivalente - LAeq). Na Figura 3 apresenta-se um exemplo de um analisador de ruído.

Na fotografia da figura seguinte é possível observar o sonómetro devidamente montado e em plena medição junto a um receptor sensível.



Figura 7 - Sonómetro em plena medição junto de um receptor sensível

3.3 Metodologia de avaliação

Do ponto de vista da saúde humana e da qualidade de vida das populações o ruído é um dos factores mais importantes a ser estudado num processo de avaliação de impactes ambientais quando existem fontes sonoras associadas, como é o caso da utilização de explosivos.

A avaliação de impactes deve basear-se nos níveis de ruído existentes, no caso das actividades estarem já a decorrer, ou em níveis de ruído característicos de pegadas de fogo semelhantes às que se pretendem levar a cabo, no caso de ainda não terem sido realizados quaisquer trabalhos. Nesta avaliação devem também ser consideradas todas as operações associadas ao uso de explosivos, a montante e a jusante de um rebentamento, respectivamente a perfuração e a remoção, conforme referido anteriormente. No Tabela 4 apresentam-se os níveis de ruído típicos das actividades referidas.

Tabela 4 - Níveis de ruído típicos das actividades de perfuração, rebentamento e remoção

PARÂMETROS	NÍVEIS TÍPICOS
Perfuração	
Fragmentação localizada da rocha para aplicação dos explosivos	85 – 100 dB(A) (*)
Rebentamento dos explosivos	
Detonação dos explosivos	70 – 140 dB(A) (**)
Remoção	
Carregamento e transporte do material desmontado por acção dos explosivos	65 - 85 dB (*)

(*) – níveis de ruído junto do equipamento, mas fora da cabina;

(**) – níveis de ruído medidos em modo Impulsivo.

Para avaliar os impactes devem ser medidos os níveis de ruído com a pedreira ou a obra em laboração (ruído ambiente na presença do ruído particular), se as actividades já estiverem a decorrer, e o ruído ambiente residual com a pedreira ou a obra parada (ruído ambiente na ausência do ruído particular). Se ainda não existirem actividades industriais será medido apenas o ruído residual.

A medição pode ser efectuada através do método directo, que consiste em medir o ruído durante todo o tempo de duração deste, ou pelo método indirecto, que consiste em medir os vários tipos de ruído característicos do período de referência durante intervalos de tempo representativos, sendo o nível de ruído resultante obtido através da seguinte expressão:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (T_i 10^{0,1 L_{Aeq,T_i}}) \quad (6)$$

em que: LAeq, T – Nível sonoro contínuo equivalente para todo o período T
n – Número de medições realizadas
LAeq, Ti – Nível sonoro contínuo equivalente para cada intervalo Ti

O ruído gerado na frente de desmonte será sentido na própria pedreira ou obra e na sua envolvente próxima, pelo que a zona alvo do estudo deve contemplar toda a área de propagação do ruído.

Para avaliar o ruído devem ser identificados, na área a estudar, todos os receptores sensíveis ao ruído, nomeadamente escolas, hospitais, centros de saúde, habitações, ecossistemas a proteger, edifícios sensíveis, etc.

Na avaliação dos impactes ao nível deste descritor podem ser efectuadas medições de ruído pontuais junto dos receptores sensíveis ou elaborados mapas de ruído com recurso a programas computacionais de modelação.

Os impactes deverão ser avaliados quer para o período diurno, quer para o nocturno, neste último, no caso de existir licença de laboração.

Os critérios a adoptar para a avaliação de impactes deverão ter em conta a legislação vigente, a normalização nacional e internacional, padrões e directrizes contidos em publicações, recomendações de entidades credenciadas, códigos de boas práticas, assim como a política da empresa em causa.

Tratando-se o uso de explosivos de uma operação dinâmica, na medida em que as pegas de fogo poderão variar de posição espacial em função dos avanços pretendidos para os desmontes, na avaliação de impactes deverá ser prevista essa situação, uma vez que os impactes podem sofrer variações em função do tempo.

Por último, devem ser também considerados os impactes cumulativos gerados por outras actividades ruidosas, quer da pedreira ou obra, quer de outras fontes próximas.

3.4 Análise de resultados

A análise de resultados do ruído ambiente, através de avaliações pontuais de ruído realizadas junto dos receptores sensíveis ou de mapas de ruído, permite a caracterização da situação de referência conforme se apresenta na Figura 8.

Projectando a situação de referência, em função dos trabalhos ruidosos previstos é possível analisar os potenciais impactes com base nos critérios legais e outros (Figura 8).

Embora as classificações constantes do RGR (zonas sensíveis e zonas mistas) ainda não estejam definidas na maior parte dos Planos Directores Municipais, as actividades ruidosas a efectuar em determinada zona deverão ter em conta o que está estipulado sobre essa matéria, tentando convergir para os requisitos exigidos (limites estabelecidos para zonas sensíveis e mistas), em função das características do local.

Por outro lado, deve ser cumprido o critério de incomodidade (Capítulo III - Actividades ruidosas em geral, artigo 8º - Actividades ruidosas permanentes), junto dos receptores sensíveis, sobretudo se se tratar de uma actividade ruidosa permanente como é o caso das pedreiras.

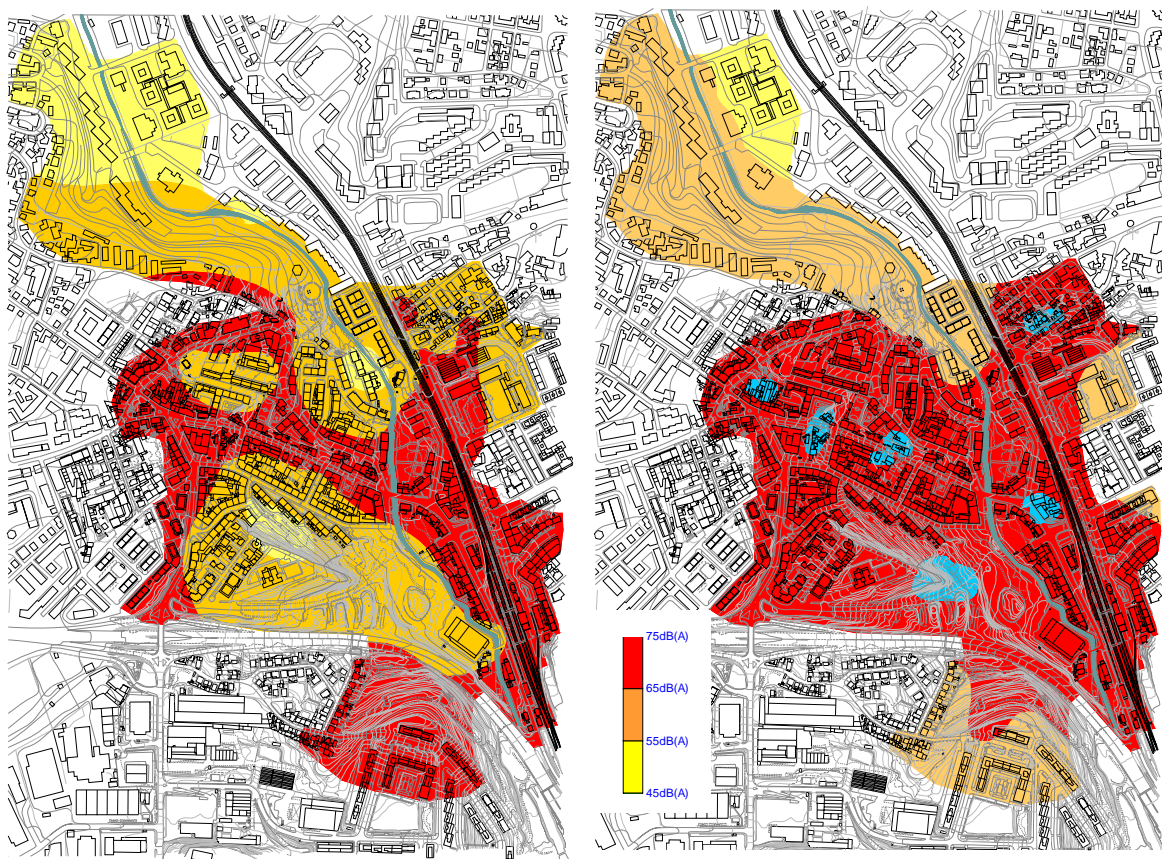
O estudo do ruído com base em mapas de ruído permite analisar a evolução dos níveis de ruído expectáveis em toda a envolvente e também junto de receptores sensíveis, sendo, no entanto, aconselhável a realização de medições pontuais no caso de existir necessidade de analisar situações de incomodidade, sobretudo junto de escolas, hospitais, lares, ou outras zonas onde a qualidade do ambiente sonoro deverá ser preservada.

Relativamente aos critérios de exposição pessoal ao ruído, deve analisar-se se os níveis de ruído de pico resultantes dos rebentamentos excedem os 140 dB(A), junto de receptores sensíveis, e se os

trabalhadores da pedreira ou obra, estão sujeitos a níveis de exposição superiores a 90 dB(A). Este último critério resulta num impacte ambiental local, mais do foro da segurança, higiene e saúde no trabalho.

Tendo como base a classificação de impactes, o ruído gerado por rebentamentos de substâncias explosivas podem ser classificados como impactes negativos, certos, directos, temporários, cuja magnitude e significância depende das características da intervenção e dos valores ambientais em causa.

Os efeitos dos impactes gerados pelo ruído podem afectar o ser humano, ao nível fisiológico (perda de audição) e psicológico (problemas em dormir, stress, problemas de concentração, etc.), gerar danos materiais, devido à onda aérea, e afectar determinadas espécies faunísticas existentes na envolvente.



Mapa de ruído da situação de referência
(ausência de ruídos particulares)

Zona urbana onde se pretende realizar um conjunto de obras de melhoramento de acessibilidades em que algumas das escavações serão com recurso a explosivos.

Mapa de ruído da fase de construção
(presença de ruídos particulares)

Zona urbana onde se estão a realizar obras de melhoramento de acessibilidades em que algumas das escavações serão com recurso a explosivos.

Figura 8 - Estudo de incidência com base em mapas de ruído

4 Conclusões

A utilização de explosivos industriais requer uma cuidadosa preparação das operações, onde a caracterização dinâmica dos maciços rochosos ocupa lugar preponderante. A adequada selecção dos explosivos implica na igualdade (ou proximidade) das impedâncias características do explosivo e da rocha, seguindo-se o estabelecimento da lei de propagação de vibrações, através da detonação de cargas teste, e a monitorização sistemática de vibrações e ruídos, tendo em vista o respeito pela legislação e a minimização de impactes ambientais.

É peculiar desta operação constatar que esta minimização de impactes é tendencialmente acompanhada pela combinação de factores que minimiza os custos unitários de escavação, tornando muito importante a engenharia de optimização associada ao emprego de explosivos para a escavação de maciços rochosos.

Referências

- [1] Brüel&Kjaer (2002) - *Environmental Noise – Sound & Vibration Measurement* ; A/S. Naerum, Denmark.
- [2] Gayubas, J. C. (1998) - *Guía práctica para el control del Ruído Ambiental en Canteras e Graveras*. Ed. Carlos Lopez Jimeno – Entorno Gráfico S.L. Madrid.
- [3] Lopez Jimeno, C. et al (1995) - *Drilling and Blasting*. A. A. Balkema. Rotterdam.
- [4] Rau, J.G. and Wooten, D.C. (1980) - *Environmental impact analysis handbook*. McGraw-Hill Book Co. New York.
- [5] Dinis da Gama (2002) – *Environmental baseline studies of vibrations in urban areas*. Proceedings of Eurock 2002. SPG. Funchal, Madeira.
- [6] Bastos, M. e Guerreiro, H. (2005) – *Curso sobre explosivos para responsáveis técnicos de pedreiras e obras de escavação*. Centro de Geotecnia do IST, Lisboa.